

УДК 556.16.047

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОГРАФА РЕЧНОГО СТОКА**А. А. Волчек¹, С. В. Сидак², С. И. Парфомук³, О. П. Мешик⁴, Ю. П. Коляда⁵,
М. В. Борушко⁶, А. С. Протасевич⁷**¹ Д. г. н. РФ и РБ, профессор, профессор кафедры природообустройства, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: prof.volchak@yandex.by² К. г. н., доцент кафедры математики и информатики, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: harchik-sveta@mail.ru³ К. т. н., доцент, заведующий кафедрой математики и информатики, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: parfom@mail.ru⁴ К. т. н., доцент, декан факультета инженерных систем и экологии, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: omeshik@mail.ru⁵ Магистр, старший преподаватель кафедры природообустройства, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: juliagirodnuik99@gmail.com⁶ Магистр, старший преподаватель кафедры лингвистических дисциплин и межкультурных коммуникаций, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: borushko.marina@mail.ru⁷ Магистр, зам. декана по идеологической и воспитательной работе факультета инженерных систем и экологии, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: protasevichnastua@gmail.com**Реферат**

В статье рассматриваются актуальные вопросы математического моделирования гидрографа речного стока и разработки автоматизированных методик прогнозирования половодий на территории Республики Беларусь. Исследование обусловлено необходимостью повышения точности гидрологических прогнозов в условиях изменяющегося климата и антропогенного воздействия на речные бассейны. Разработана адаптивная методика определения дат начала и окончания половодий, основанная на анализе ежедневных расходов воды. Методики апробированы на данных 16 гидрологических постов за 40-летний период (1971–2010 гг.). Результаты верификации показали высокую точность определения дат начала половодья (средняя абсолютная ошибка 2–3 дня в 90 % случаев) и удовлетворительную точность для дат окончания половодья (5–6 дней в 90 % случаев). Предложен алгоритм экстраполяции гидрографа для прогнозирования речного стока с заблаговременностью от 1 до 10 суток. Разработанный программный модуль обеспечивает автоматизацию процесса прогнозирования и позволяет учитывать климатические изменения через механизм самообучения. Практическая значимость работы заключается в создании инструментов для эффективного управления водными ресурсами, защиты населения от чрезвычайных ситуаций и рационального использования водных объектов. Предложенные методики применимы как для однопиковых, так и для многопиковых гидрографов, что расширяет возможности их использования в различных гидрологических условиях.

Ключевые слова: гидрограф, дата начала половодья, дата окончания половодья, заблаговременность прогноза, моделирование, половодье, прогноз, речной сток, экстраполяция.

MATHEMATICAL MODELING OF RIVER FLOW HYDROGRAPH**A. A. Volchak, S. V. Sidak, S. I. Parfamuk, O. P. Meshyk, Yu. P. Kaliada, M. V. Barushka, A. S. Pratasevich****Abstract**

The article addresses current issues of mathematical modeling of river flow hydrographs and development of automated methods for predicting floods in the Republic of Belarus. The research is driven by the need to improve the accuracy of hydrological forecasts under changing climate conditions and anthropogenic impact on river basins. An adaptive methodology has been developed to determine the start and end dates of floods, based on the analysis of daily water discharges. The techniques were tested using data from 16 hydrological stations over a 40-year period (1971–2010). Verification results demonstrated high accuracy in determining the start of floods (average absolute error of 2–3 days in 90 % of cases) and satisfactory accuracy for the end dates (5–6 days in 90 % of cases). An extrapolation algorithm for the hydrograph has been proposed to forecast river flow with a lead time of 1 to 10 days. The developed software module automates the forecasting process and incorporates a self-learning mechanism to account for climate changes. The practical significance of the work lies in creating tools for effective water resource management, protecting the population from emergencies, and rational use of water bodies. The proposed techniques are applicable to both single-peak and multi-peak hydrographs, expanding their usability under various hydrological conditions.

Keywords: hydrograph, flood start date, flood end date, forecast lead time, modeling, flood, forecast, river runoff, extrapolation.

Введение

Климатические изменения и растущее антропогенное воздействие на речные бассейны приводят к трансформации условий формирования и режима речного стока [1, 2]. В частности, наблюдаются изменение сезонного распределения стока, увеличение частоты экстремальных гидрологических явлений, модификация взаимосвязи между метеорологическими условиями и реакцией водосборов [3–5]. Такая динамика существенно усложняет прогнозирование гидрологического режима и требует регулярной актуализации параметров прогнозных схем по мере поступления новых гидрометеорологических данных.

Повышение точности и заблаговременности гидрологических прогнозов, а также расширение возможностей их практического применения приобретают на сегодняшний день особую актуальность [6]. Это необходимо для более эффективного управления

водными ресурсами, их рациональной эксплуатации и надёжной охраны, а также для защиты населения и объектов инфраструктуры от участвовавших в последние годы экстремальных явлений. Ключевое значение в системе предупреждения чрезвычайных ситуаций приобретают краткосрочные и среднесрочные прогнозы расходов и уровней воды в речных створах: заблаговременность таких прогнозов должна составлять от 1 до 5 суток для краткосрочных прогнозов и от 6 до 10 суток – для среднесрочных. При этом именно регулярная актуализация параметров прогнозных схем выступает необходимым условием поддержания требуемой точности прогнозов.

Регулярная актуализация параметров невозможна без надёжных алгоритмов расчленения гидрографа и выделения генетических составляющих стока – в первую очередь для корректного учёта вклада половодья и последующего построения прогнозных траекторий. Именно поэтому

моделирование гидрографа стока с детализацией по фазам водного режима становится критически важным этапом гидрологического прогноза. Определяющей фазой водного режима рек Беларуси является весеннее половодье, расчёт характеристик которой сопряжён с рядом трудностей. Особенно затруднительным оказывается выделение периода половодья, поскольку существующие методы и способы определения дат его начала и окончания носят преимущественно описательный характер и не содержат формализованных формул для их вычисления. Ситуация дополнительно осложняется многообразием форм гидрографов: при сильно растянутом из-за похолоданий снеготаянии или при выпадении обильных дождей на реках формируются половодья со сложными очертаниями, состоящие из нескольких самостоятельных волн; в годы же с дружным снеготаянием наблюдаются стройные однопиковые половодья, характеризующиеся большой интенсивностью подъёма и спада.

Несмотря на длительную историю развития методов расчленения гидрографа, в последние десятилетия актуальность этой задачи существенно возросла в связи с трансформацией природных и антропогенных факторов формирования стока. Так, в России вопросами расчленения гидрографов активно занимались Б. И. Куделин, заложивший основы автоматизированных подходов, а также М. Б. Киреева, Е. П. Ред, Н. Л. Фролова и другие исследователи, развивавшие методы выделения генетических составляющих стока и адаптировавшие алгоритмы к условиям российских водосборов – в частности, к выраженным сезонным половодьям и значительной доле снеготалого питания [7–9]. Значимым вкладом в развитие методологии стала работа Хасанова с соавторами, в которой проведена оптимизация параметров ряда методов расчленения гидрографа для повышения точности выделения базисного стока на примере бассейна реки Белая [10]. На основе многолетних данных гидрологических постов и оценки по критериям Нэша–Сатклиффа и Клинга–Гупты выполнен сравнительный анализ методов, в ходе которого подобраны оптимальные параметры для исследуемой речной сети. Установлено, что наилучшие результаты обеспечивают метод Экхардта и метод скользящего интервала; при этом выявлена нецелесообразность применения метода Экхардта с низким значением максимально возможного индекса базисного стока (BFImax) на водосборах со скальными породами. Полученные результаты позволили авторам сформулировать рекомендации по выбору и применению методов расчленения гидрографа для данного бассейна.

За рубежом существенный вклад в решение задачи расчленения гидрографа внесли Г. Экхардт, предложивший фильтрационный метод выделения базисного стока, Дж. У. Кирхнер с концепцией ансамблевого разделения гидрографа, а также Ф. Р. Холл и Р. Лайн, чьи работы легли в основу ряда расчётных схем, широко применяемых в Северной Америке и Европе [11–13].

Однако, несмотря на значительный объём опубликованных работ по расчленению гидрографов и моделированию стока, прямое применение зарубежных и даже общероссийских методик к условиям Республики Беларусь зачастую оказывается недостаточно эффективным. Необходимость подбора индивидуальных схем выделения периода половодья для каждой страны обусловлена разнообразием физико-географических и климатических условий: в одних регионах сток формируется преимущественно за счёт таяния снега и характеризуется чётко выраженным весенним половодьем, в других доминируют дождевые паводки с менее предсказуемой динамикой, а в третьих существенную роль играет ледниковое или подземное питание. Все эти факторы определяют специфику формы гидрографа и требуют настройки параметров расчленения с учётом местных закономерностей формирования стока, чтобы обеспечить достоверность гидрологических оценок и прогнозов.

Также одним из немаловажных факторов в моделировании гидрологических процессов в современных условиях является развитие автоматизированных методов определения характеристик речного стока и его прогнозирования [14–16]. Особую значимость приобретают автоматизированные подходы к определению характеристик половодья. Возможность автоматизации гидрологических расчётов напрямую определяется наличием алгоритмизируемых методов: в частности, алгоритм выделения периода половодья задаёт чёткие правила идентификации этой фазы во временном ряду. Его отсутствие означает, что этап обработки данных остаётся субъективным и ручным, что блокирует сквозную автоматизацию процесса и снижает оперативность подготовки прогнозов.

Цель исследования – адаптация методов моделирования гидрографа стока применительно к специфике водосборов Беларуси с целью их использования в автоматизированных расчётах.

Задачи исследования:

- разработка методики автоматического определения дат начала и окончания половодий;
- адаптация алгоритма экстраполяции гидрографа;
- верификация предложенных методик на репрезентативной выборке;
- автоматизация процесса моделирования гидрографа стока;
- оценка точности и надёжности разработанных подходов.

Материалы и методы исследования

Выделение периода половодья

Начиная с 1981 г. в справочнике «Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод» данные о сроках прохождения половодья не публикуются, а предоставляются Государственным учреждением «Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды» по запросу потребителей.

Согласно ТКП 17-10.25-2010, выборка дат начала и окончания половодья выполняется по гидрографам стока с учетом хода метеорологических элементов: «... За дату начала половодья принимается первая дата с заметным увеличением расхода воды, предшествующая, как правило, дате с резким повышением уровня и расхода воды. За дату окончания принимается дата на спаде половодья, после прохождения основного объема талых вод, когда интенсивность спада резко снизилась, и отчетливо обозначился переход к летней межени, или дата, соответствующая переломной точке на гидрографе, отделяющей фазу спада от наступившего вслед за ней дождевого паводка» [17].

Для решения задачи выделения периода половодья использована методика Е. В. Шевниной, которая в рамках данного исследования была адаптирована к условиям рек Беларуси [18]. В работе Е. В. Шевниной «Методика расчета характеристик весеннего половодья по данным ежедневных расходов воды» предложены числовые критерии для определения дат начала и окончания половодья, на основе которых рассчитаны ретроспективные характеристики весеннего половодья, и проведена оценка предложенной методики расчета slopes стока на примере данных средних рек Российской Арктики за период с начала наблюдений до 1980 г. [18]. Для определения по предложенной методике дат начала и окончания половодья требуются величины α_n (пороговое значение относительного изменения расхода воды за временной шаг) и β_n (продолжительность периода, в течение которого эта величина превышена), при вычислении которых использованы опубликованные в ежегодных изданиях государственного водного кадастра данные о сроках начала половодья, оптимизированные для каждого водосбора [18]. При отсутствии таких данных расчет периода половодья по предложенной методике не представляется возможным.

В настоящей работе предложен адаптированный для территории Беларуси подход для расчета дат начала и окончания половодья на основе данных о ежедневных расходах воды речного стока.

Пусть $Q(t)$ – ежедневный расход воды в t -й день года, м³/с; $t = \overline{1, n}$, n – количество дней в году. Порядок определения дат начала половодья:

1) получим ряд значений $D(t)$ темпа роста ежедневных расходов воды, показывающий, насколько изменилось значение $Q(t)$ по сравнению с предыдущим значением $Q(t-1)$ в относительных величинах:

$$D(t) = \frac{Q(t) - Q(t-1)}{Q(t-1)}, \quad t = \overline{2, n}; \quad (1)$$

2) для обеспечения более стабильного представления ряда $D(t)$ и устранения единичных выбросов применим к нему метод скользящего среднего с длиной интервала сглаживания $h=11$, в результате чего получим ряд $\tilde{D}(t)$:

$$\tilde{D}(t) = \frac{\sum_{i=t-5}^{t+5} D(i)}{h}, \quad t = \overline{7, n-5}; \quad (2)$$

3) найдем значение t в пределах от 40 до 110, при котором наблюдается максимальное значение $\tilde{D}(t)$. Обозначим эту точку $\tilde{t}_{max}$;

4) итеративно просматриваем ряд $\tilde{D}(t)$ с точки $\tilde{t}_{max}$ в направлении уменьшения t , пока выполняется условие $\tilde{D}(t) > 0,02$. Первую точку, в которой нарушается данное условие, обозначим $\tilde{t}_b$. За начало половодья примем точку t_b , определяемую по формуле

$$t_b = \tilde{t}_b + (h-1)/2. \quad (3)$$

Определение даты окончания весеннего половодья представляется собой более сложную задачу по сравнению с определением даты его начала, что обусловлено рядом факторов. В отличие от резкого подъема расхода воды во время начала половодья, спад расходов воды зачастую происходит более постепенно и растянут во времени. Спад половодья может быть не плавным, а характеризоваться серией кратковременных увеличений расходов воды, обусловленных дополнительными осадками или таянием снега, что требует использования более сложной схемы расчета даты окончания половодья.

Введем некоторые дополнительные обозначения. Разность между наибольшим (Q_{max}) и наименьшим (Q_{min}) расходами речного стока за определенный временной интервал определяет размах (амплитуду) колебаний. Так как в научной литературе по гидрологии нет специального устоявшегося названия отношению Q_{max} к Q_{min} , введем в рассмотрение величину $A_{fl} = \frac{Q_{max_fl}}{Q_{min_fl}}$, где Q_{max_fl} – максимальный расход воды за период весеннего половодья, Q_{min_fl} – минимальный расход воды весеннего половодья. Величину A_{fl} назовем относительным коэффициентом зарегулированности половодья.

Тогда относительным коэффициентом зарегулированности за период времени от t_1 до t_2 назовем величину $A_{fl}|_{t_1}^{t_2}$, вычисляемую по формуле

$$A_{fl}|_{t_1}^{t_2} = \frac{Q_{max_fl}|_{t_1}^{t_2}}{Q_{min_fl}|_{t_1}^{t_2}}, \quad (4)$$

где $Q_{min}|_{t_1}^{t_2}$ – минимальный расход воды за период времени от t_1 до t_2 , м³/с.

Для определения даты окончания половодья предлагается следующий алгоритм:

1) определяем значение максимального расхода воды Q_{max_fl} как максимальный из ежедневных расходов воды с середины февраля по конец апреля с учетом того, что реки Беларуси относятся к рекам восточно-европейского типа со стоком во все сезоны года, но с преобладанием весеннего стока. За t_{max} примем день, в который наблюдается пик половодья;

2) вычисляем средний ($\bar{Q}|_{t_{max}}^{180}$) и минимальный ($Q_{min}|_{t_{max}}^{180}$) расходы воды за период от t_{max} до конца июня;

3) определяем относительный коэффициент зарегулированности стока за период от t_{max} до конца июня:

$$k = A_{fl}|_{t_{max}}^{180} = \frac{Q_{max_fl}}{Q_{min}|_{t_{max}}^{180}}. \quad (5)$$

Обозначим через

$$l = Q_{min}|_{t_{max}}^{180} \cdot (1 + 0,35 \cdot k); \quad (6)$$

4) для определения даты окончания половодья (t_e) «спускаем вправо» по гидрографу от точки с координатами (t_{max} , Q_{max}) до тех пор, пока выполняется одно из двух условий:

$$Q(t) \geq \min(\bar{Q}|_{t_{max}}^{180}, l), \quad D(t) < -0,01, \quad (7)$$

где $D(t)$ – относительное изменение расхода воды за сутки, определяемое по формуле (1).

Первая точка (t_e), в которой нарушаются оба условия (7), будем считать датой окончания весеннего половодья.

Дополнительные параметры в критериях определения дат начала и окончания половодья ($\bar{D}(t) > 0,02$, $D(t) < -0,01$, $h=11$, коэффициент 0,35 в формуле (6)) выбраны на основании минимизации средней абсолютной ошибки (в днях) определения дат начала и окончания половодья.

Экстраполяция гидрографа

На сегодняшний день разработан широкий спектр методов краткосрочного и среднесрочного прогнозирования речного стока. Они в той или иной степени учитывают закономерности формирования стока на водосборе и перемещения водных масс в русловой сети. Такие методы реализуются в форме физико-математических моделей, концептуальных гидрологических моделей, статистических зависимостей, связывающих прогнозируемые величины с известными на момент составления прогноза гидрологическими и метеорологическими характеристиками. При создании автоматизированной системы подготовки и выпуска гидрологических прогнозов особенно важно использовать метод, который отличается простотой и универ-

сальностью, обеспечивает устойчивые результаты с достаточной точностью, позволяет ежедневно формировать прогнозы среднесуточных расходов и уровней воды на протяжении всего года.

В связи с этим для исследования характеристик стока рек Беларуси адаптирован и реализован метод экстраполяции гидрографа, позволяющий ежедневно в течение всего года прогнозировать характеристики стока рек с заблаговременностью от 1 до 10 суток [19, 20].

Суть метода экстраполяции гидрографа заключается в том, что прогноз расхода воды $\bar{Q}(t + \Delta t)$ на период заблаговременности Δt представляется в виде линейной комбинации текущего расхода воды $Q(t)$, соответствующего дате составления прогноза, и k предшествующих значений расхода $Q(t-1), \dots, Q(t-k)$. Математически это выражается формулой

$$\bar{Q}(t + \Delta t) = \sum_{i=0}^{k-1} \alpha_i(\Delta t) \cdot Q(t-i) + b(\Delta t), \quad (8)$$

где $\alpha_0(\Delta t), \alpha_1(\Delta t), \dots, \alpha_{k-1}(\Delta t)$ и $b(\Delta t)$ – параметры линейной модели. Они зависят от заблаговременности прогноза (Δt) и определяются путём оценки по данным гидрологических наблюдений

Предлагаемый метод пригоден как для краткосрочного, так и для среднесрочного прогнозирования речного стока – как в рамках отдельной фазы водного режима, так и на протяжении всего гидрологического года. При этом метод не сводится к формальной экстраполяции: параметры расходов воды за k суток, фигурирующие в формуле (8), косвенно отражают ключевые процессы формирования стока. К ним относятся: поступление талых и дождевых вод, динамика почвенной влаги и запасов подземных вод, изменение объёмов воды в русле и на пойме, а также трансформация волны половодья или паводка за предшествующий период.

Для оценки качества прогноза, полученного с использованием модельного уравнения (8) использованы следующие показатели: *среднеквадратическая ошибка прогноза* (RMSE, м³/с), *средняя абсолютная ошибка* в процентах (MAPE, %) и *коэффициент детерминации* (R^2), определяемые по формулам:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Q_i - \bar{Q}_i)^2}{N}}, \quad (9)$$

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|Q_i - \bar{Q}_i|}{Q_i} \cdot 100 \%, \quad (10)$$

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (\bar{Q}_i - \bar{Q})(Q_i - \bar{Q})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (\bar{Q}_i - \bar{Q})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (Q_i - \bar{Q})^2}} \right]^2, \quad (11)$$

где N – объем выборки;

Q_i – фактические значения расходов воды, м³/с;

$\bar{Q}_i$ – прогнозные значения расхода воды, м³/с;

i – номер наблюдения в выборке;

$\bar{Q}$ – среднее значение фактических расходов воды, м³/с;

$\bar{Q}$ – среднее значение спрогнозированных расходов воды, м³/с.

Для автоматизации процесса прогнозирования и оценки качества прогнозов применительно к произвольному набору речных створов и связанных с ними гидрологических постов разработан специализированный программный модуль на базе Excel + VBA. Модуль обеспечивает считывание и обработку данных из одного или нескольких файлов; расчёт параметров прогнозной схемы для каждого речного створа; оценку показателей качества формируемых прогнозов; генерацию сводной таблицы с итоговыми результатами прогнозирования.

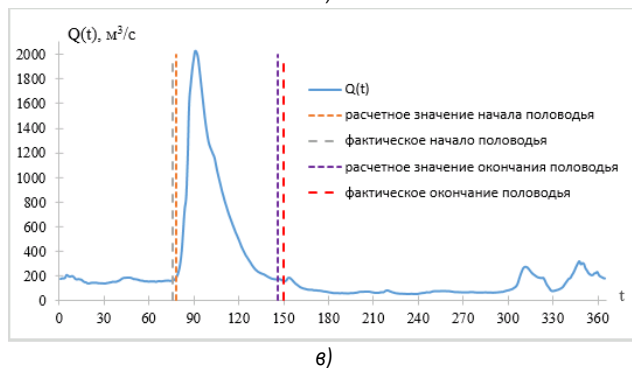
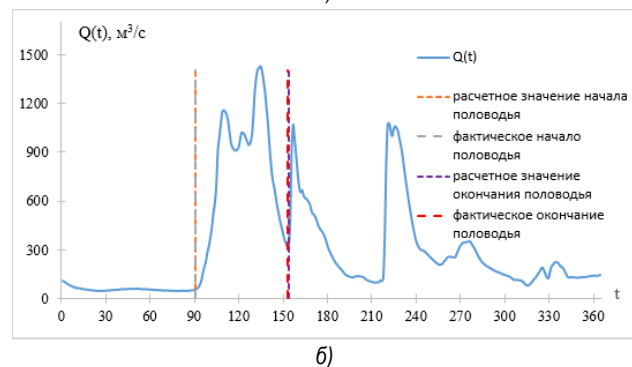
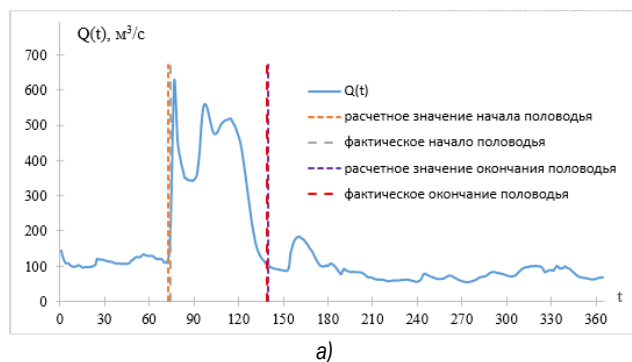
Результаты исследования и их обсуждение

Верификация модели выделения периода половодья выполнена на основании данных о ежедневных расходах воды на равномерно расположенных по территории Беларуси 16 гидрологических постах (перечень постов представлен в таблице 1) за 40-летний период 1971–2010 гг.

В среднем по 16 рассматриваемым створам предложенный алгоритм выделения сроков прохождения половодья позволяет определять даты начала половодья со средней абсолютной ошибкой два-три дня в 90 % случаев, даты окончания половодья со средней абсолютной ошибкой пять-шесть дней в 90 % случаев. Стоит отметить, что предложенная модель выделения дат начала и окончания половодья показала хорошие результаты как при работе с однопиковыми гидрографами, так и с многопиковыми (рисунок 1).

Таблица 1 – Средняя абсолютная ошибка (в днях) определения дат начала и окончания половодья

Река – Створ	Дата начала половодья		Дата окончания половодья	
	ошибка по всей выборке	ошибка в 90 % случаев	ошибка по всей выборке	ошибка в 90 % случаев
р. Западная Двина – г. Витебск	3–4	1–2	10–11	5–6
р. Западная Двина – г. Полоцк	3–4	1–2	11–12	6–7
р. Оболь – г. Оболь	4–5	1–2	10–11	5–6
р. Неман – г. Мосты	6–7	2–3	12–12	6–7
р. Неман – г. Гродно	6–7	2–3	11–12	7–8
р. Щара – г. Слоним	7–8	3–4	13–14	9–10
р. Днепр – г. Могилев	3–4	2–3	6–7	4–5
р. Березина – г. Борисов	5–6	1–2	10–11	6–7
р. Сушанка – д. Суша	4–5	1–2	8–9	2–3
р. Сож – г. Славгород	5–6	1–2	9–10	5–6
р. Сож – г. Гомель	6–7	2–3	7–8	4–5
р. Проня – д. Летяги	5–6	1–2	7–8	4–5
р. Припять – г. Мозырь	6–7	3–4	10–11	8–9
р. Ясельда – д. Сенин	6–7	4–5	10–11	7–8
р. Цна – д. Дятловичи	6–7	3–4	8–9	5–6
р. Уборть – д. Краснобережье	7–8	3–4	8–9	4–5
среднее	5–6	2–3	9–10	5–6



а) р. Днепр – г. Могилев (2001 г.); б) р. Западная Двина – г. Витебск (1987 г.); в) р. Западная Двина – г. Витебск (2004 г.)

Рисунок 1 – Гидрографы с фактическими и смоделированными датами начала и окончания половодья для разных типов гидрографов

Смоделированные числовые критерии выделения периода половодья для рек Беларуси могут быть использованы для массовых расчетов доли половодья в годовом стоке, выделения поверхностной и грунтовой составляющей с приемлемой точностью, а также для автоматизации расчленения гидрографа стока.

Рассмотрим пример работы реализованного метода экстраполяции гидрографа на примере ежедневных гидрологических наблюдений за расходами воды в створе Припять – г. Мозырь.

При заданной заблаговременности прогноза $\Delta t = 1, \dots, 10$ параметрами $\alpha_0(\Delta t), \alpha_1(\Delta t), \dots, \alpha_{k-1}(\Delta t)$ и $b(\Delta t)$ формулы (8) оценивались методом наименьших квадратов по ряду ежедневных гидрологических наблюдений за исследуемый период.

В таблице 2 приведены параметры формулы (8) получения прогноза за ежедневных расходов воды в створе р. Припять – г. Мозырь.

Таблица 2 – Параметры формулы (8) получения прогноза ежедневных расходов воды в створе р. Припять – г. Мозырь с заблаговременностью Δt

Δt	α_4	α_3	α_2	α_1	α_0	b	R^2
1	-0,064	0,078	-0,135	-0,555	1,673	0,941	0,999
2	-0,185	0,197	-0,190	-1,071	2,243	2,579	0,997
3	-0,274	0,207	-0,176	-1,447	2,679	4,797	0,994
4	-0,319	0,180	-0,233	-1,677	3,031	7,426	0,989
5	-0,336	0,154	-0,305	-1,928	3,390	10,378	0,982
6	-0,399	0,232	-0,401	-2,203	3,738	13,700	0,974
7	-0,488	0,308	-0,407	-2,500	4,045	17,399	0,965
8	-0,560	0,331	-0,402	-2,681	4,260	21,444	0,953
9	-0,600	0,320	-0,423	-2,797	4,438	25,716	0,941
10	-0,636	0,335	-0,473	-2,918	4,618	30,167	0,927

На рисунке 2 (а) для этого створа приведены совмещенные графики хода фактических и спрогнозированных на основании модели (8) и коэффициентов, представленных в таблице 2, с заблаговременностью $\Delta t = 1$ сутки расходов воды в 2018 году, на рисунке 2 (б) – с заблаговременностью $\Delta t = 5$ суток, на рисунке 2 (в) – с заблаговременностью $\Delta t = 10$ суток.

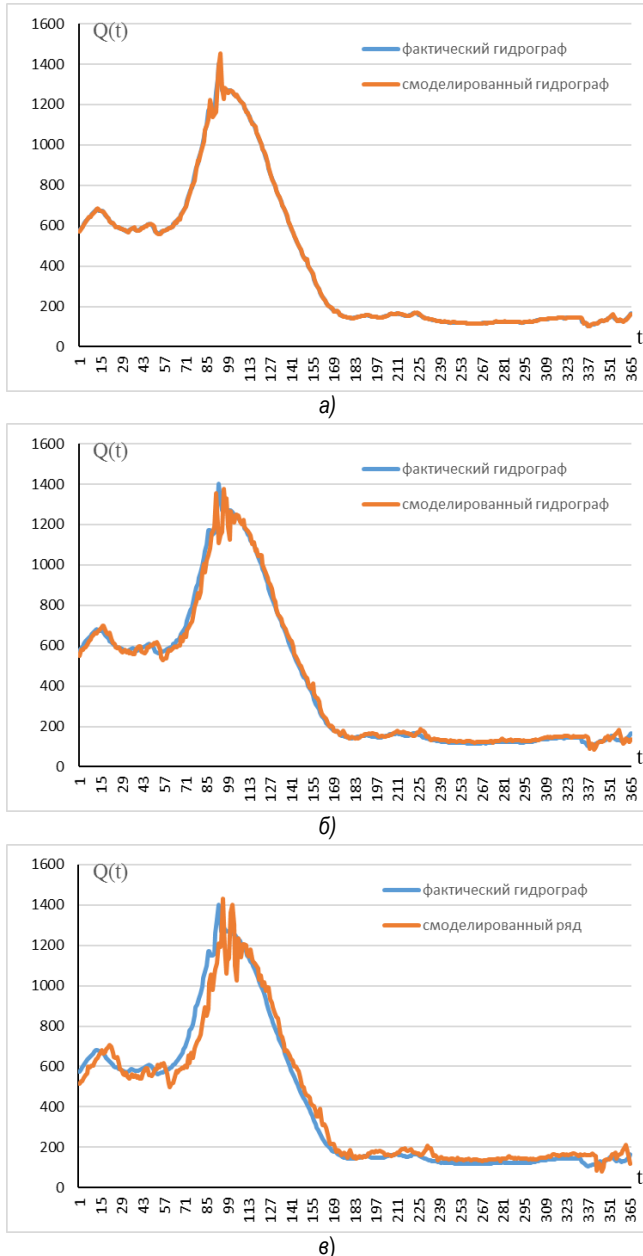


Рисунок 2 – Фактические и спрогнозированные с заблаговременностью $\Delta t = 1$ суток (а), $\Delta t = 5$ суток (б), $\Delta t = 10$ суток (в) гидрографы в створе р. Припять – г. Мозырь в 2018 г.

Значения показателя RMSE составляет 10,75, 33,08, 63,12 м³/с, соответственно для $\Delta t = 1$, $\Delta t = 5$, $\Delta t = 10$ суткам. Значения показателя MAPE составляет 1 %, 6 %, 12 %, соответственно для $\Delta t = 1$, $\Delta t = 5$, $\Delta t = 10$ суткам.

Созданный программный модуль для получения гидрологических прогнозов обладает функцией самообучения. Эта функция реализуется за счёт регулярного обновления параметров прогностических формул на основе вновь поступающих данных гидрологических наблюдений. Такой механизм позволяет адекватно учитывать климатические изменения и антропогенное воздействие, влияющие на условия формирования и режим речного стока.

Заключение

В результате проведенных исследований разработана и апробирована адаптивная методика определения дат начала и окончания периода половодья на реках Беларуси. Разработаны числовые критерии выделения периода половодья с учетом специфики речно-

го стока Беларуси. Создан автоматизированный алгоритм расчета дат начала и окончания половодья по данным ежедневных расходов воды, в основу которого положены разработанные критерии. Проведена верификация методики на данных 16 гидрологических постов за 40-летний период (1971–2010 гг.). Методика показала следующие результаты точности определения: даты начала половодья – средняя абсолютная ошибка два-три дня в 90 % случаев, даты окончания половодья – средняя абсолютная ошибка пять-шесть дней в 90 % случаев. Практическая значимость данной разработки заключается в следующем: методика успешно апробирована на реках всей территории Беларуси, обеспечивает достоверное определение дат половодья как для однопиковых, так и для многопиковых гидрографов, позволяет проводить массовые расчеты характеристик половодья, автоматизирует процесс расчленения гидрографа.

Реализованный метод экстраполяции гидрографа обеспечивает возможность круглогодичного прогнозирования ежедневных расходов воды с заблаговременностью от 1 до 10 суток. Прогноз строится на основе простой расчётной формулы, параметры которой калибруются по данным ежедневных гидрологических наблюдений за выбранный пользователем период. Для автоматизации процесса получения прогнозов и оценки их качества разработан специализированный компьютерный модуль. Он позволяет оперативно пересчитывать все параметры и характеристики при изменении состава речных створов или поступлении новых гидрологических данных. Результаты верификации подтвердили, что метод экстраполяции гидрографа в сочетании с автоматизированным модулем даёт удовлетворительные прогнозы расходов для рек, характеризующихся плавным изменением гидрологических показателей.

Работа выполнена при поддержке БРФФИ (грант № X25KI-036).

Список цитированных источников

1. State of the Global Climate 2025 // World Meteorological Organization. – URL: <https://wmo.int/publication-series/state-of-global-climate/state-of-global-climate-2025> (date of access: 01.06.2026).
2. Волчек, А. А. Многолетняя изменчивость стока рек Беларуси в условиях изменения климата и антропогенных воздействий / А. А. Волчек, С. В. Сидак, С. И. Парфомук // Актуальные научно-технические и экологические проблемы сохранения среды обитания : сб. тр. IV Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 55-летию Брест. гос. техн. ун-та и 50-летию ф-та инженерных систем и экологии, Брест, 7–8 окт. 2021 г. / Брест. гос. техн. ун-т ; редкол.: А. А. Волчек [и др.]. – Брест, 2021. – С. 101–113.
3. Волчек, А. А. Оценка современных изменений максимального стока рек Беларуси / А. А. Волчек, Ан. А. Волчек, С. В. Сидак // География. – 2020. – Т. 4. – С. 26–32.
4. Volchak, A. Intra-annual runoff distribution in the Pripyat River basin / A. Volchak, S. Parfomuk, S. Sidak // ICBTE 2020, E3S Web of Conferences. – 2020. – Т. 212. – P. 01016. – DOI: 10.1051/e3sconf/202021201016.
5. Волчек, А. А. Динамика изменения водных ресурсов Беларуси в современных условиях / А. А. Волчек, С. В. Сидак, С. И. Парфомук // Инновации: от теории к практике : сб. науч. ст. VIII Междунар. науч.-практ. конф., Брест, 21–22 окт. 2021 г. / Брест. гос. техн. ун-т; редкол.: В. В. Зазерская [и др.]. – Брест, 2021. – С. 81–89.
6. Investigating Impacts of Climate Change on Runoff from the Qinhui River by Using the SWAT Model and CMIP6 Scenarios / J. Sun, H. Yan, Z. Bao, G. Wang // Water. – 2022. – Vol. 14, № 11. – P. 1778. – DOI: 10.3390/w14111778.
7. Алгоритм автоматизированного расчленения гидрографа по методу БИ Куделина GrWat: проблемы и перспективы / Е. П. Рец, М. Б. Киреева, Т. Е. Самсонов [и др.] // Водные ресурсы. – 2022. – Т. 49, № 1. – С. 27–42. – DOI: 10.31857/S032105962201014X.
8. Куделин, Б. И. Принципы региональной оценки естественных ресурсов подземных вод / Б. И. Куделин. – М.: МГУ, 1960. – 343 с.
9. Чижова, Ю. Н. Двухкомпонентное расчленение гидрографа р. Протвы / Ю. Н. Чижова, Е. П. Рец, Н. А. Тебенькова [и др.] // Вестн. МГУ. Сер. География. – 2021. – № 6. – С. 48–56.

10. Оптимизация параметров методов расчленения гидрографа для повышения их эффективности на примере бассейна реки Белой / И. А. Хасанов, А. Н. Елизарьев, Д. А. Тараканов, Дм. А. Тараканов // Гидросфера. Опасные процессы и явления. – 2025. – Т. 6, № 2. – С. 125–137. – DOI: 10.34753/HS.2024.6.1.125.
11. Eckhardt, K. A comparison of baseflow indices, which were calculated with seven different baseflow separation methods / K. Eckhardt // Journal of Hydrology. – 2008. – Vol. 352 (1–2). – P. 168–173.
12. Lyne, V. Stochastic time-variable rainfall-runoff modelling / V. Lyne, M. Hollick // Institute of engineers Australia national conference. Barton, Australia: Institute of Engineers Australia. – 1979. – Т. 79, Vol. 10. – P. 89–93.
13. Kirchner, J. W. Quantifying new water fractions and transit time distributions using ensemble hydrograph separation: theory and benchmark tests / J. W. Kirchner // Hydrology and Earth System Sciences. – 2019. – Vol. 23, № 1. – P. 303–349.
14. Ensemble machine learning for global hydrological prediction / C. Liu, D. Liu, L. Mu, J. Zhang // Water Resources Research. – 2022. – Vol. 58, № 12. – Art. e2021WR030993.
15. Berhail, S. The use of the recession index as indicator for components of flow / S. Berhail, L. Ouerdachi, H. Boutaghane // Energy Procedia. – 2012. – № 18. – P. 741–750.
16. Framework for ensemble hydrograph prediction using machine learning and hydrological models / G. I. Brunner, N. Addor, M. Zappa, F. Comola // Hydrology and Earth System Sciences. – 2021. – Vol. 25, No. 3. – P. 1423–1441.
17. Охрана окружающей среды и природопользование. Гидрометеорологическая деятельность. Государственный водный кадастр. Правила составления справочника «Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод»: ТКП 17-10.25-2010 (02120). – Введ. 01.03.11. – Минск: Минприроды, 2011. – 59 с.
18. Шевнина, Е. В. Методика расчета характеристик весеннего половодья по данным ежедневных расходов воды / Е. В. Шевнина // Проблемы Арктики и Антарктики. – 2013. – № 1 (95). – С. 44–50.
19. Экстраполяция гидрографов как метод краткосрочного прогнозирования речного стока / С. В. Борщ, Ю. А. Симонов, А. В. Христофоров [и др.] // Гидрологические исследования и прогнозы. – 2018. – № 3 (369). – С. 74–86.
20. Прогнозирование стока рек России методом экстраполяции гидрографа / С. В. Борщ, В. М. Колий, Н. К. Семенова [и др.] // Вестник МГУ. Сер. География. – 2021. – № 2 (380). – С. 77–94. – DOI: 10.37162/2618-9631-2021-2-77-94.
5. Volchek, A. A. Dinamika izmeneniya vodnyh resursov Belarusi v sovremennykh usloviyakh / A. A. Volchek, S. V. Sidak, S. I. Parfomuk // Innovacii: ot teorii k praktike : sb. nauch. st. VIII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Brest, 21–22 okt. 2021 g. / Brest. gos. tekhn. un-t; redkol.: V. V. Zazerskaya [i dr.]. – Brest, 2021. – S. 81–89.
6. Investigating Impacts of Climate Change on Runoff from the Qinhuai River by Using the SWAT Model and CMIP6 Scenarios / J. Sun, H. Yan, Z. Bao, G. Wang // Water. – 2022. – Vol. 14, № 11. – P. 1778. – DOI: 10.3390/w14111778.
7. Algoritm avtomatizirovannogo raschleneniya gidrografa po metodu BI Kudelina GrWat: problemy i perspektivy / E. P. Rec, M. B. Kireeva, T. E. Samsonov [i dr.] // Vodnye resursy. – 2022. – Т. 49, № 1. – S. 27–42. – DOI: 10.31857/S032105962201014X.
8. Kudelin, B. I. Principy regional'noj ochenki estestvennykh resursov podzemnykh vod / B. I. Kudelin. – M.: MGU, 1960. – 343 s.
9. CHizhova, YU. N. Dvuhkomponentnoe raschlenenie gidrografa r. Protvy / YU. N. CHizhova, E. P. Rec, N. A. Teben'kova [i dr.] // Vestn. MGU. Ser. Geografiya. – 2021. – № 6. – S. 48–56.
10. Optimizaciya parametrov metodov raschleneniya gidrografa dlya povysheniya ih effektivnosti na primere basseina reki Beloi / I. A. Hasanov, A. N. Elizar'ev, D. A. Tarakanov, Dm. A. Tarakanov // Gidrosfera. Opasnye processy i yavleniya. – 2025. – Т. 6, № 2. – S. 125–137. – DOI: 10.34753/HS.2024.6.1.125.
11. Eckhardt, K. A comparison of baseflow indices, which were calculated with seven different baseflow separation methods / K. Eckhardt // Journal of Hydrology. – 2008. – Vol. 352 (1–2). – P. 168–173.
12. Lyne, V. Stochastic time-variable rainfall-runoff modelling / V. Lyne, M. Hollick // Institute of engineers Australia national conference. Barton, Australia: Institute of Engineers Australia. – 1979. – Т. 79, Vol. 10. – P. 89–93.
13. Kirchner, J. W. Quantifying new water fractions and transit time distributions using ensemble hydrograph separation: theory and benchmark tests / J. W. Kirchner // Hydrology and Earth System Sciences. – 2019. – Vol. 23, № 1. – P. 303–349.
14. Ensemble machine learning for global hydrological prediction / C. Liu, D. Liu, L. Mu, J. Zhang // Water Resources Research. – 2022. – Vol. 58, № 12. – Art. e2021WR030993.
15. Berhail, S. The use of the recession index as indicator for components of flow / S. Berhail, L. Ouerdachi, H. Boutaghane // Energy Procedia. – 2012. – № 18. – P. 741–750.
16. Framework for ensemble hydrograph prediction using machine learning and hydrological models / G. I. Brunner, N. Addor, M. Zappa, F. Comola // Hydrology and Earth System Sciences. – 2021. – Vol. 25, No. 3. – P. 1423–1441.
17. Ohrana okruzhayushchei sredy i prirodopol'zovanie. Gidrometeorologicheskaya devatel'nost'. Gosudarstvennyi vodnyi kadastr. Pravila sostavleniya spravochnika «Mnogoletnie dannye o rezhime i resursah poverhnostnykh vod»: TKP 17-10.25-2010 (02120). – Vved. 01.03.11. – Minsk: Minprirody, 2011. – 59 s.
18. SHEvnina, E. V. Metodika rascheta harakteristik vesennego polovod'ya po dannym ezhednevnykh raskhodov vody / E. V. SHEvnina // Problemy Arktiki i Antarkтики. – 2013. – № 1 (95). – S. 44–50.
19. Ekstrapolyaciya qidrografov kak metod kratkosrochnogo prognozirovaniya rechnogo stoka / S. V. Borshch, YU. A. Simonov, A. V. Hristoforov [i dr.] // Gidrologicheskie issledovaniya i prognozy. – 2018. – № 3 (369). – S. 74–86.
20. Prognozirovanie stoka rek Rossii metodom ekstrapolyacii gidrografa / S. V. Borshch, V. M. Kolij, N. K. Semenova [i dr.] // Vestnik MGU. Ser. Geografiya. – 2021. – № 2 (380). – S. 77–94. – DOI: 10.37162/2618-9631-2021-2-77-94.

References

Материал поступил 30.06.2026, одобрен 02.07.2026, принят к публикации 02.07.2026